



FACULTAD DE FARMACIA
UNIVERSIDAD COMPLUTENSE

TRABAJO FIN DE GRADO
PAPEL DEL SUELO EN LA
TOXICIDAD DEL CADMIO

Autor: Elena Sánchez León, Karen Sarria Valdés

Tutor: Inmaculada Valverde Asenjo

Convocatoria: Junio

ÍNDICE

- Resumen	2
- Introducción	2
- Objetivos	3
- Material y métodos	3
- Resultados y discusión	
Fuentes de exposición	
Exposición a los humanos	
Efectos	
Formas de Cd en el suelo	
Factores que influyen en la retención/ disponibilidad del Cd en el suelo	
Contenido de Cd total en los suelos	
- Conclusiones	15
- Bibliografía	16

RESUMEN

El cadmio (Cd) es un metal traza que aunque carece de actividad biológica, es bioacumulable, persistente y tóxico, acumulándose en los diferentes cultivos, punto de vital importancia ya que su absorción por las plantas es el primer paso para su entrada a la cadena alimentaria y por consiguiente supone un peligro para la salud humana. La deposición atmosférica de Cd procedente de la industria y la minería y, en particular, pero los fertilizantes fosfatados y lodos de depuradora contribuyen en mayor medida al aumento de los niveles de Cd en la superficie de los suelos agrícolas. Los alimentos constituyen el 90% de la exposición al Cd por la población general, principalmente cereales y hortalizas, aunque la exposición al Cd procedente de fuentes alimentarias está determinada no sólo por los niveles de Cd en los alimentos, sino también por los patrones de consumo. Aunque la ingesta semanal real de Cd por la población general es pequeña, su reducido margen con respecto al margen de seguridad estimado hace necesario reducir su exposición. En el suelo, el Cd está mayoritariamente en forma complejada, precipitada, o incorporada a la estructura cristalina (fijación) y sólo una pequeña proporción del metal está en la solución del suelo (las cantidades extraídas por los cultivos representan menos del 1% de las cantidades totales de Cd en los suelos). Sin embargo, las actividades antropogénicas incrementan la concentración metálica en la solución del suelo propiciando su absorción. No obstante, la disponibilidad del Cd no solo depende de su especiación química sino también de las propiedades del suelo, por lo que los parámetros que afectan a las propiedades del suelo, en particular, pH y potencial redox, son factores claves para valorar su retención/disponibilidad.

INTRODUCCIÓN

El cadmio es un metal traza que carece de actividad biológica y aunque su movilidad sea reducida y se encuentre presente en muy bajas concentraciones, supone un riesgo para la salud pública y el medio ambiente ya que este elemento se caracteriza por ser bioacumulable, persistente y tóxico, acumulándose en los diferentes cultivos, punto de vital importancia ya que la absorción del Cd por las plantas es el primer paso para su entrada a la cadena alimentaria y por consiguiente supone un peligro para la salud humana.

Por otro lado su toxicidad va a depender de muchos factores tanto del elemento en estudio, cadmio en este caso, como de las propiedades del suelo, por lo que esta complejidad debe ser tomada en cuenta en la gestión de los suelos con concentraciones significativas de Cd.

OBJETIVOS

- Conocer las principales fuentes de contaminación por cadmio de los suelos
- Averiguar si la exposición supone un peligro para la población
- Saber las distintas formas en las que se puede encontrar el cadmio en el suelo
- Conocer cómo afecta la tipología del suelo a la disponibilidad del cadmio

MATERIAL Y MÉTODOS

La elaboración de este trabajo se ha efectuado seleccionando artículos de web of Science. Así mismo se ha consultado documentación de las siguientes páginas web relacionadas con el contenido del trabajo: La Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA), del Programa de las Naciones Unidas para el Ambiente (UNEP), la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) y de la Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades de EEUU (ASTDR).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

FUENTES DE CADMIO

El cadmio es un elemento que se encuentra en la naturaleza representando el 1.5×10^{-5} % en peso de la corteza terrestre. El nivel natural de cadmio en el suelo es generalmente de 0.06 a 1.1ppm y proviene principalmente de erupciones volcánicas y de la alteración y la erosión de las rocas. Cd puede liberarse al aire por arrastre de partículas de polvo, erupciones volcánicas, incendios forestales u otros fenómenos naturales. El Cd existe en las aguas de los océanos de tal modo que pueden llegar a la atmósfera mediante la generación de aerosoles marinos (ATSDR 2017, EFSA 2009). Encontramos el cadmio en el suelo asociado a minerales de cinc como la esfalerita (ZnS) o en algunos minerales propios del Cd como son la greenockita o blenda de cadmio (CdS), la otavita (CdCO₃) y la monteponita (CdO) (Jiménez, A. 2003b).

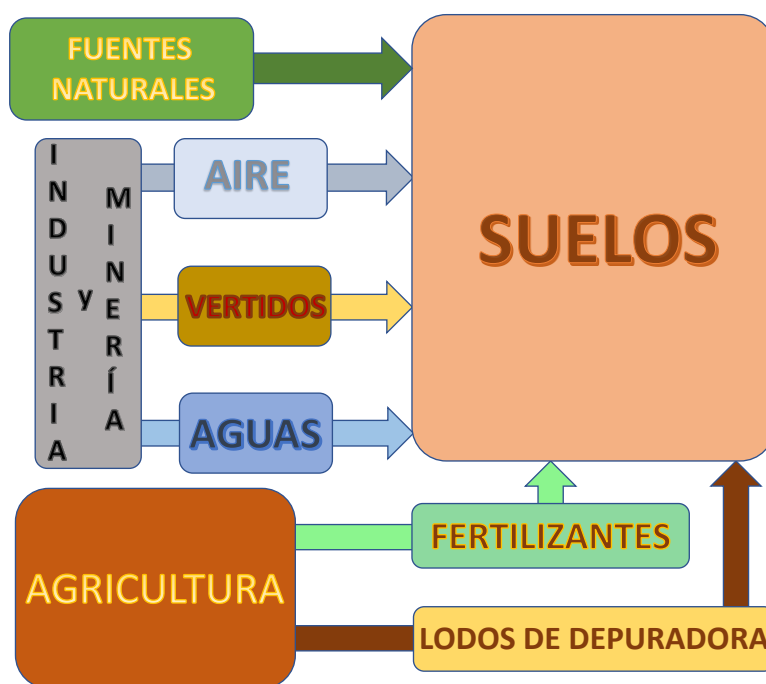


Figura 1: Principales vías de llegada del Cadmio al suelo

Casi todo el cadmio se obtiene como subproducto en el procesamiento industrial de minerales de cinc, cobre y plomo. Se emplea en recubrimientos, algunos tipos de soldadura, baterías de níquel-cadmio recargables, reactores nucleares. Su óxido, hidróxido y cloruro se usa en galvanotecnia, su sulfuro como pigmento amarillo, los silicatos y boratos se emplean en los tubos de TV color, etc. (Jiménez, A. 2003b).

Las industrias pueden contribuir a la contaminación del suelo principalmente (Alloway, B. J., 1995b): por emisión de partículas que son transportados por el aire y por vertidos que van a parar a los suelos (ATSDR 2017; IARC 1993).

El Cd (como óxido, cloruro y sulfato) existirá en el aire proveniente de emisiones industriales como partículas o en forma de Cd^{+2} en procesos a alta temperatura (fundiciones, incineradores) (ATSDR 2012, UNEP 2010).

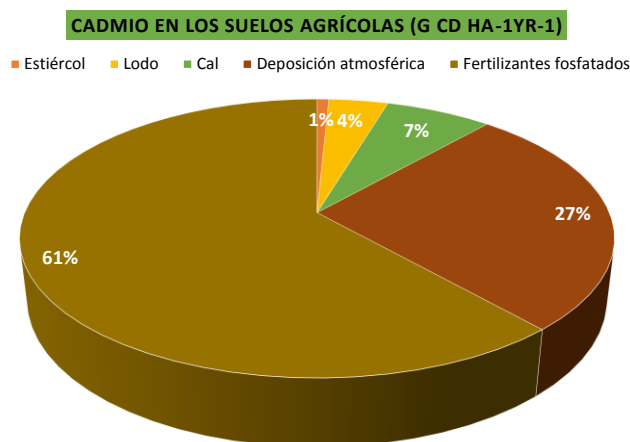
Las rocas fosfóricas, que son la materia prima de todos los fertilizantes fosfatados, contienen niveles de metales pesados que varían según su origen geográfico, pero que generalmente son superiores al promedio de la corteza terrestre. El compuesto fosfatado en las rocas fosfóricas es algún tipo de apatita $[\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3 (\text{F}, \text{Cl}, \text{OH})]$. En la actualidad son explotados pocos yacimientos de roca fosfórica y cerca del 90 por ciento de la producción mundial es utilizada por la industria para la fabricación de fertilizantes fosfatados.

La deposición atmosférica, los fertilizantes fosfatados y los lodos de depuradora son los que más contribuyen al aumento de los niveles de Cd en la superficie de los suelos agrícolas. A finales de los 90 la deposición atmosférica era la mayor fuente de cadmio en los suelos agrícolas, pero en la actualidad ha disminuido más de un 90% debido a la mejora por parte de las industrias de los sistemas de gestión de residuos, aplicación de tecnologías de control de las emisiones y la regulación más restrictiva de las emisiones de Cd al medio ambiente (Morrow 2010, UNEP 2010). Estudios recientes han documentado que, aunque las emisiones atmosféricas no tienen actualmente un impacto importante sobre el contenido de Cd en los suelos, las actividades agrícolas como el uso de fertilizantes fosfatados y lodos de depuradora si aumentan significativamente los niveles de Cd en el suelo (Bergkvist et al., 2003).

Las prácticas agrícolas constituyen una importante fuente de metales en el suelo en muchas partes del mundo, especialmente en zonas de intensa actividad (Alloway, B. J., 1995b). Las principales fuentes de Cd son: impurezas en los fertilizantes (Cd, Cr, Mo, Pb, U, V, Zn), lodos de depuradora (Zn, Cd). No obstante, la deposición atmosférica de Cd puede ser importante en las zonas agrícolas próximas a los focos industriales de emisión y las áreas urbanas.

La vía más importante de incorporación de cadmio a los suelos agrícolas es la utilización de fertilizantes fosfatados. Respecto a estos, la absorción de metales pesados tóxicos por las plantas, principalmente de cadmio, es significativamente menor a partir de la roca fosfórica que de los fertilizantes fosfatados solubles producidos de la misma roca. La reacción del cadmio en el suelo tratado con la roca fosfórica es bastante diferente de aquella de los fertilizantes fosfatados solubles en agua debido a que el Cd ligado a la apatita en la roca fosfórica es insoluble en agua. La reactividad de la roca fosfórica influye en la disponibilidad de cadmio para la planta debido a que el Cd está ligado al P en la estructura de la apatita (EFSA 2009).

Por otro lado, también generan una contaminación importante en los suelos los lodos, que se obtienen a partir de las aguas residuales urbanas y por su contenido en nutrientes son usados en la fertilización. Desde hace unos años, el uso de lodos de depuradora con Cd está limitado por el Real Decreto 1310/1990. de 29 de octubre, por el que se regula la utilización de los lodos de depuración en el sector agrario (1990) en el cual se dan niveles máximos permitidos en función del pH del suelo.



Procedencia del Cadmio en los suelos agrícolas, Smolders & Six 2013

EXPOSICIÓN A LOS HUMANOS

La exposición humana al cadmio tiene lugar principalmente por vía oral, a través de la dieta e inhalación.

La mayor parte del cadmio en la dieta humana proviene de los productos agrícolas, ya que los cultivos absorben cadmio del suelo (UNEP 2010). Los alimentos constituyen el 90% de la exposición al Cd por la población general. El Cd en los cultivos depende de la absorción de los suelos y la tasa de absorción está influenciada principalmente por la forma en que se encuentre el cadmio, las propiedades físico-químicas del suelo, presencia de otros elementos en el suelo, como el zinc, y la especie vegetal. (EFSA, 2009)

Los principales productos alimenticios que contribuyen a la exposición al Cd son los cereales y las hortalizas. La carne y el pescado normalmente contienen contenidos más bajos de Cd. Los despojos animales como el riñón y el hígado pueden presentar altas concentraciones de Cd, ya que estos son los órganos en los que se concentran los metales (UNEP, 2008).

La exposición al cadmio procedente de fuentes alimentarias está determinada no sólo por los niveles de cadmio en los alimentos, sino también por los patrones de consumo. Así, los grupos de alimentos que contribuyeron a la mayor parte de la exposición al cadmio en la dieta, principalmente por el alto consumo, son cereales y

productos derivados de cereales, hortalizas, nueces y legumbres, raíces de almidón o patatas y carne y productos cárnicos. Algunos de los alimentos que contienen altos niveles de cadmio son raramente consumidos por la población europea en general (por ejemplo, semillas oleaginosas y despojos comestibles) y, por lo tanto, pueden no ser importantes para la ingesta total. Otros alimentos con alto consumo en la población total o en algunas subpoblaciones pueden ser los principales contribuyentes a la ingesta total de cadmio, incluso si contienen sólo bajos niveles de cadmio. (EFSA 2009).

Debido a diferentes patrones de consumo y pesos inferiores, los lactantes y los niños reciben una especial atención en las evaluaciones de riesgo (UNEP 2008). La exposición es realmente significativa en niños porque pasan más tiempo en el exterior en contacto con el suelo. La exposición media estimada al cadmio en la dieta de los niños de 12 años de edad o menos era cerca del 60% mayor que la de los adultos. Además, la población vegetariana y los fumadores se consideran grupos de riesgo debido al mayor consumo de productos vegetales. Las hojas de tabaco acumulan naturalmente cadmio (Morrow 2010). Los niveles de cadmio en los cigarrillos varían mucho dependiendo de la fuente de producción (ATSDR 2017).

En la Figura 2 se resumen los datos estimados por la EFSA (2019) referidos a la exposición al Cd a través de la dieta.

Tabla 1: Exposición al Cadmio en la población europea, EFSA 2009

	Intervalo (µg/kg*)	Media
Infantes (0 - 1 años)	1,97 - 3,50	2,735
Niños pequeños (2-3 años)	3,80 - 5,80	4,85
Niños (4-10 años)	3,23 - 3,96	3,595
Adolescentes (11-18 años)	1,87 - 2,54	2,205
Adultos (19-65 años)	1,41 - 1,98	1,69
Vegetarianos	5,4	5,4

Como se comentó anteriormente, el cadmio se libera al medio ambiente de la contaminación industrial y entra en la cadena alimentaria a través del suelo y el agua potable. Las personas que viven en zonas industriales y dependen de productos cultivados en el país podrían tener una mayor exposición que la población en general

(EFSA 2009). La exposición ocupacional también puede ser un factor importante para trabajadores en industrias, incineradoras, metalurgia, etc (ATSDR 2017)

De acuerdo con la EFSA (2012) la ingesta semanal tolerable es de 2,5 μg / kg de peso corporal y debe mantenerse a fin de garantizar un alto nivel de protección de todos los consumidores, incluidos los subgrupos expuestos y vulnerables de la población. Sin embargo, algunos estudios concluyeron que, aunque es poco probable que se produzcan efectos adversos en un individuo a la exposición por ingestión (la mayoría de los individuos tenían niveles de ingesta por debajo de este, la ingesta semanal real de cadmio por la población general era pequeño y en algunas poblaciones puede ser inexistente, no obstante era superado por determinados grupos de riesgo) es necesario reducir la exposición al cadmio a nivel de población debido al limitado margen de seguridad entre la exposición estimada y la ingesta semanal tolerable.

La inhalación es otra de las vías de entrada posible, pero comparado con la ingestión es insignificante salvo que la exposición sea continuamente repetida a lo largo del tiempo (IARC 1993). Adquiere sobre todo importancia en el caso de los fumadores debido a la cantidad de Cd que absorbe la planta del tabaco y que es inhalado y absorbido al fumar. También las personas que se ven expuestas a ambientes cercanos a industrias emisoras de Cd a la atmósfera o que trabajan en ellas ven incrementada su exposición por esta vía (ATSDR 2017, EFSA 2012)

EFFECTOS

Una vez ingerido, su absorción es relativamente baja (3-5%), pero se retiene eficientemente en el riñón e hígado del cuerpo humano, con una semivida biológica muy larga que oscila entre 10 y 30 años. El cadmio es principalmente tóxico para el riñón, especialmente a las células tubulares proximales donde se acumula con el tiempo y puede causar disfunción renal, tras una exposición prolongada y / o alta el daño tubular puede progresar a una disminución de la tasa de filtración glomerular y, finalmente, a una insuficiencia renal. La Agencia Internacional de Investigación sobre el Cáncer, órgano de la Organización Mundial de la Salud (OMS) especializado en el cáncer, ha clasificado el cadmio como un carcinógeno humano (Grupo 1) sobre la base de los estudios ocupacionales. Los datos más recientes sobre la exposición humana al cadmio en la población general se han asociado estadísticamente con el aumento del

riesgo de cáncer, como en el pulmón (asociado con la ruta de exposición inhalatoria), el endometrio, la vejiga y el pecho.

La biodisponibilidad, la retención y, por consiguiente, la toxicidad del cadmio se ven afectadas por varios factores como el estado nutricional (almacenes bajos de hierro en el cuerpo) y los embarazos múltiples, enfermedades o condiciones de salud preexistentes.

CONTENIDO DE Cd TOTAL EN LOS SUELOS

El contenido de Cd en el suelo es de 0.06 a 1.1 ppm., con valores medios de 0.53 ppm, por lo que valores superiores reflejarían el impacto antropogénico. Los niveles de Cd de fondo en los suelos superficiales oscilan entre 0,01 y 2,7 mg / kg, aunque se han reportado valores de hasta 1.781 mg Cd / kg de suelo en sitios muy contaminados (ATSDR 2017)

FORMAS DE Cd EN EL SUELO

El cadmio puede encontrarse en el suelo bajo diferentes formas, soluble en la solución del suelo, como ion intercambiable de los coloides que integran el complejo de cambio, formando complejos con la materia orgánica, adsorbidos en los óxidos hidróxidos de Fe, Mn, Al, sulfatos y fosfatos, o bien como constituyentes de los minerales secundarios del suelo (ROCA FERNANDEZ, 2017)

De acuerdo con Morgan (2013) y Ramos Miras (2002) se pueden distinguir las siguientes formas de Cd en el suelo (Figura 2):

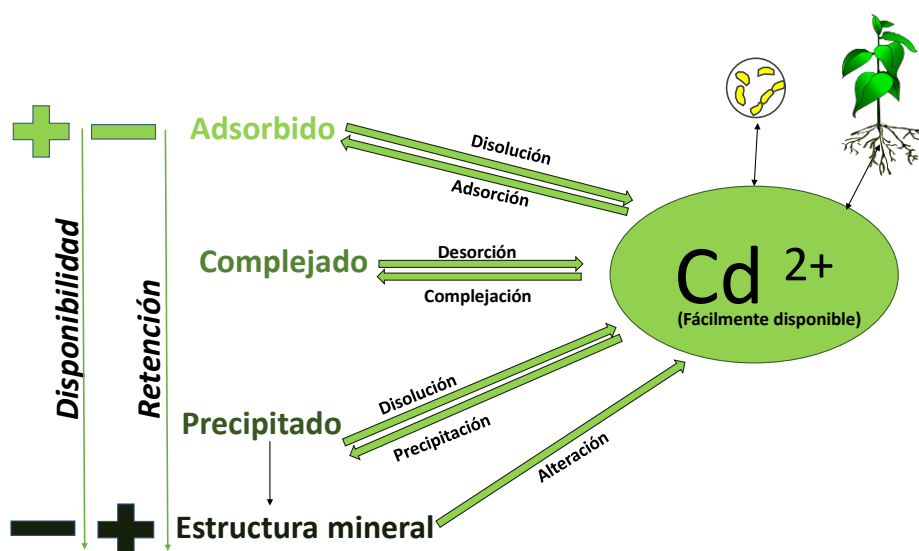


Figura 2. Disponibilidad del Cadmio

Por consiguiente, el Cd puede estar:

- **En la solución del suelo:** esta ocupa el espacio poroso y baña la superficie de las partículas orgánicas e inorgánicas y el sistema radicular. El Cd se encuentra en dicha solución en forma iónica (Cd^{2+}) principalmente y es fácilmente disponible para su absorción por las plantas y organismos del suelo. Algunas plantas pueden absorber grandes cantidades de este elemento originando problemas de toxicidad para la planta y el consiguiente paso a través de la cadena trófica. La concentración de Cd en la solución del suelo es relativamente baja en torno a $6 \mu\text{g/L}$ en suelos no contaminados, alcanzándose valores de hasta $400 \mu\text{g/L}$ en suelos contaminados.

Los iones metálicos que no son absorbidos inmediatamente de la solución del suelo, experimentan diversos procesos físicos y químicos, extrayéndolos de la solución durante cortos o largos periodos de tiempo, y por lo tanto afectando a su disponibilidad:

- **Adsorbidos en el complejo de cambio:** las partículas coloidales, del tipo arcillas y materia orgánica, poseen una carga superficial predominantemente negativa que atrae a los iones cargados positivamente desde la solución del suelo, creando densas capas de iones adsorbidos a la superficie de los coloides (adsorción no específica). Dicha adsorción implica básicamente uniones de tipo electrostático o fuerzas de Van der Waals de corto alcance, formándose una asociación débil entre el ion adsorbido y los coloides del suelo, lo que hace que estos iones sean fácilmente intercambiados o desplazados por otros cationes.

Dicha adsorción está condicionada, entre otros, por la concentración de los cationes en solución, y de esta forma el Cd puede quedar retenido en la superficie coloidal.

- **Complejado:** a diferencia del anterior el ion metálico no está solvatado y tiene lugar la formación de enlaces covalentes entre el metal y el ligando, y las especies retenidas no serán desplazadas como ocurría con el intercambio catiónico.

El ion Cd^{2+} puede formar complejos con los grupos OH de la materia mineral, como los oxihidróxidos de Fe y Mn y las arcillas presentes en el suelo. Este proceso es pH-dependiente, de forma que las condiciones ácidas promueven la desorción y liberación del metal a la solución del suelo, mientras que a pH mayores la retención del metal esta favorecida.

El ion Cd^{2+} también puede formar quelatos con la materia orgánica del suelo.

Los principales grupos funcionales de la materia orgánica implicados en la formación de dichos complejos metálicos son los grupos carboxílico, fenólico y alcohólico. La acidificación del suelo juega un papel muy importante ya que una disminución del pH implica la ruptura metal-grupo funcional, liberándose el Cd^{2+} a la solución del suelo.

- **Precipitado:** el Cd puede precipitar desde la solución del suelo como carbonatos, fosfatos, hidróxidos, humatos, fulvatos etc., extrayendo el metal de la solución del suelo de forma más permanente. Además, en condiciones anaerobias, el Cd puede precipitar con el sulfuro de hidrógeno que se forma por la reducción biológica de los iones sulfato.

Para los hidróxidos, esta precipitación tendrá lugar cuando la concentración del ion metálico y los aniones excedan el valor del producto de solubilidad del Cd (aportes procedentes de residuos, fertilizantes etc., en magnitudes mucho más elevadas que las que aparecen en la naturaleza).

La precipitación en forma de carbonatos y sulfuros metálicos está controlada además por la presión parcial del CO_2 y del SH_2 (ejemplo para el carbonato:

$\text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$). De esta forma la aplicación de caliza reduce en gran medida la solubilidad y disponibilidad del Cd.

- **Fijado a la estructura mineral:** la liberación a la solución del suelo va a requerir la ruptura de la estructura mineral por alteración química.

En el suelo, los metales están mayoritariamente en forma complejada, precipitada, o incorporada a la estructura cristalina (fijación) y sólo una pequeña proporción del metal está en la solución del suelo. En esta situación y en términos de rutas de exposición, la mayor parte de los metales estarán asociados a las partículas del suelo que serán transportadas con el viento o el agua. En consecuencia, las cantidades extraídas por los cultivos representan, en general, menos del 1% de las cantidades totales de Cd en los

suelos. Por tanto, el contenido total no es un buen índice de la disponibilidad del metal en el suelo. Ésta dependerá de los niveles de Cd en solución y del mantenimiento de dichos niveles a partir de las otras formas de Cd en el suelo. Sin embargo, las actividades antropogénicas incrementan la concentración metálica en la solución del suelo con la que el metal accedería al agua subterránea o superficial (en suelos desarrollados bajo el clima húmedo la migración del Cd a lo largo del perfil esta favorecida frente a su acumulación, Kabata-Pendias 1992), y podría ser absorbido por las plantas, ésta absorción tiene especial importancia en la transferencia del Cd desde los suelos a la cadena alimentaria, al tratarse del elemento metálico más tóxico.

FACTORES QUE INFLUYEN EN LA RETENCIÓN/ DISPONIBILIDAD DEL Cd EN EL SUELO

La movilidad del Cd es muy baja, y se acumula en los primeros centímetros del suelo, produciéndose el lixiviado a horizontes más profundos, es por esto que cuando la contaminación es antrópica, las concentraciones suelen disminuir según se avanza en profundidad, esto se debe a que la disponibilidad del Cd no solo depende de su especiación química sino también de las propiedades del suelo en el que se encuentra, es por ello que los parámetros que afectan a las propiedades del suelo llegan a ser esenciales para valorar la sensibilidad de los suelos ante los contaminantes; en concreto (GALAN Y BAENA, 2008) el pH y el potencial redox en el sistema suelo son factores con importantes efectos en la movilidad del Cd:

- **pH:** el pH es un factor decisivo en el comportamiento del Cd en el suelo.

En medios ácidos, la proporción de metales pesados en la solución del suelo es más alta, generalmente como cationes. Esto ocurre porque, por un lado, en el suelo a esos pH, hay menos grupos hidroxilos con los que coordinarse quedando reducida la posibilidad de formar precipitados por lo que quedan menos fuertemente adsorbidos (GALAN Y BAENA, 2008). Por otro lado, refleja la acción directa de los iones hidrógeno sobre los compuestos recientemente precipitados y los complejos orgánicos, liberando metales hacia la solución.

La movilidad de Cd es mayor en suelos ácidos en un rango de pH de 4,5 a 5,5. Por encima de estos pH incrementa la capacidad de sorción de Cd por el suelo y en suelos alcalinos ($\text{pH} \geq 8.5$) es bastante inmóvil.

- **Potencial redox:** las reacciones redox son reversibles y caracterizan los procesos en los que se produce un cambio de estado de oxidación, lo que implica la transferencia de electrones a otras especies. Dicho potencial está relacionado con el pH.

En particular, para el Cd en condiciones de oxidación la solubilidad disminuye al aumentar el pH. En medio ácido la solubilidad es marcadamente menor en condiciones reductoras que en oxidantes probablemente debido a la formación de sulfuros y complejos organominerales insolubles.

El sistema biológico de los suelos requiere un suministro adecuado de oxígeno, jugando un papel decisivo en muchos procesos bioquímicos como aceptor de electrones, y la utilización de ese oxígeno comporta un ajuste de la química del suelo a las condiciones ambientales de aireación. Así, si se restringe el suministro de oxígeno, ej., por inundación o compactación, el sistema suelo comienza a responder. Por ejemplo, los óxidos del suelo son utilizados por los microorganismos como reemplazo del oxígeno atmosférico, modificando la naturaleza química de dichos compuestos.

Por otro lado, las condiciones reductoras afectan a la estabilidad de los constituyentes del suelo. Así, los oxihidróxidos de Fe y Mn se reducen y dispersan en la solución del suelo y el metal retorna a la solución del suelo, incrementando la concentración en ésta. Los suelos que se encuentran en condiciones fuertemente reductoras, van a dar lugar a la reducción de sulfatos que promueven la precipitación de sulfuros de metales pesados como el Cd, eliminándolo de la solución.

En resumen, la interacción del pH y el potencial redox puede producir complejos resultados para los elementos metálicos, dependiendo de la naturaleza química del elemento y la presencia o ausencia de diversos constituyentes del suelo, incluido el microbiano. Complejidad que debe ser tomada en cuenta en la gestión de los suelos con concentraciones significativas de metales pesados, Cd en este estudio.

- **Textura:** por un lado la arcilla tiende a adsorber a los metales pesados que quedan retenidos en sus posiciones de cambio, por lo que los suelos arcillosos retienen más metales. Por el contrario los suelos arenosos carecen de capacidad de fijación de los metales pesados, los cuales pasan rápidamente al subsuelo y pueden contaminar los niveles freáticos (GARCÍA Y DORRONSORO, 2017)

- **Influencia del clima:** en suelos de climas húmedos es más probable que ocurra la migración del Cd a lo largo del perfil que su acumulación en el horizonte superficial
- **Interacción con otros elementos:** las plantas están expuestas simultáneamente a varios contaminantes y elementos del suelo, con efectos diferentes a los del Cd considerado aisladamente. En particular se han observado interacciones con el zinc, el cual reduce la absorción del Cd por las raíces, con el Cu, Mn, Ni, Se, P y Ca del suelo (Kabata y Pendias 2001)
- **La materia orgánica:** va a depender por un lado del tipo de materia orgánica, ya que si se trata de compuestos de bajo PM como los ácidos fúlvicos se va a favorecer la movilización de los quelatos a lo largo del perfil y por tanto su dispersión, si son compuestos de alto Pm como los ácidos húmicos se va a ver favorecida la retención y posterior liberación cuando la materia orgánica se mineralice.

Por otro lado va a depender de la cantidad de materia orgánica porque si la relación anión/catión es alta, es decir, hay una baja concentración de Cd va a tener lugar la movilización a lo largo del perfil.

- **La capacidad de cambio** es función fundamentalmente del contenido de arcilla y materia orgánica, cuanto mayor sea la capacidad de intercambio catiónico, mayor será la capacidad del suelo de fijar metales. El poder de adsorción depende de su valencia y del radio iónico hidratado; a mayor tamaño y menor valencia, quedarán menos fuertemente retenidos (GARCÍA Y DORRONSORO, 2017)
- **Salinidad:** El aumento en salinidad puede incrementar la movilización del Cd por dos mecanismos. Primeramente los cationes asociados con las sales (Na, K) pueden reemplazar a metales pesados en lugares de adsorción. En segundo lugar los aniones cloruro pueden formar complejos solubles estables (GARCÍA Y DORRONSORO, 2017)

En definitiva, según la forma en la que se encuentre el metal retenido en el suelo, así será la disponibilidad relativa por las plantas y por tanto la incorporación en los organismos.

CONCLUSIONES

El Cd del suelo, además de su origen natural procede principalmente de la aplicación de fertilizantes y lodos de depuradora. No obstante, aunque la deposición atmosférica de Cd puede ser importante en las zonas agrícolas próximas a los focos industriales de emisión y las áreas urbanas, la mejora por parte de las industrias de los sistemas de gestión de residuos, aplicación de tecnologías de control de las emisiones y la regulación más restrictiva de las emisiones de contaminantes al medio ambiente, han reducido la importancia de esta fuente de contaminación.

Los alimentos constituyen el 90% de la exposición humana al Cd para la población general. La ingestión es la vía principal de exposición al Cd puesto que los organismos vegetales son capaces de absorberlo desde el suelo constituyendo el primer paso para su entrada en la cadena alimentaria,

La exposición al Cd procedente de fuentes alimentarias está determinada no sólo por los niveles de Cd en los alimentos, sino también por los patrones de consumo.

La ingesta semanal real de Cd por la población general es pequeña, pero su reducido margen con respecto al margen de seguridad estimado hace necesario reducir su exposición.

Se pone de manifiesto que la movilidad y concentración de Cd en la solución del suelo es relativamente baja. En consecuencia, las cantidades extraídas por los cultivos representan menos de un 1% de las cantidades totales de Cd en el suelo por lo que el contenido total no es un buen índice de disponibilidad, ya que esta dependerá de los niveles de Cd en la solución del suelo.

La disponibilidad del Cd no solo depende de su especiación química sino también de las propiedades del suelo, por lo que los parámetros que afectan a las propiedades del suelo, en particular, pH y potencial redox, son factores claves para valorar su retención/disponibilidad.

BIBLIOGRAFÍA

Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR); Toxicological profile for Cadmium, 1999

Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR); Toxicological profile for Cadmium, 2012

Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR); Toxicological profile for Cadmium, 2017

Bergkvist et al., Long-term effects of sewage sludge applications on soil properties, cadmium availability and distribution in arable soil; 2003

Eiliv Steinnes, Andrew J Friedland ; Metal contamination of natural surface soils from long-range atmospheric transport: Existing and missing knowledge. Environmental Reviews, 2006, 14(3): 169-186

Elinder. Cadmium as an environmental hazard. 1992

FAO 2007. Utilización de las rocas fosfóricas para una agricultura sostenible. En: F. Zapata, R.N. Roy (eds.):

García, y Dorronsoro C. Contaminación por metales pesados. www.edafología.net/conta/tema15/introd.htm. Consultado 27 febrero 2017.

Herrera Marcano T. 2000. La contaminación con cadmio en suelos agrícolas. Venesuelos, 8 (1-2): 42-47

International Agency For Research On Cancer (IARC); Cadmium and Cadmium compounds, 1993

Kabata, A y Pendias, H 2002. Trace elements in soils and plants. CRC press 131-141.

McClellan GH, Van Kauwenbergh SJ. 2007. Depósitos mundiales de fosfatos. En Zapata F, Roy RN (eds): Utilización de las rocas fosfóricas para una agricultura sostenible. FAO 13: 11-16.

Morgan, R 2013. Soil, heavy metals and human health. En: Brevik E.C. y Burgess L.C. (eds.): Soils and human health. CRC press 59-82.

Ramos Miras, J 2002. Estudio de la contaminación por metales pesados y otros procesos de degradación química en los suelos en los invernaderos del poniente almeriense. CRC press 34-42.

Roca Fernández A. Contaminación de suelos por metales pesados. www.infoagro.com/abonos/contamiancion_suelos_metales_pesados.htm. Consultado 15 marzo 2017

Smolders E, Six L. 2013. Revisiting and updating the effect of phosphate fertilizers to cadmium accumulation in European agricultural soils. http://ec.europa.eu/health/scientific_committees/environmental_risks/docs/scher_o_168_rd_en.pdf.

The European Food Safety Authority (EFSA) Journal 2009;980, 1-139

The European Food Safety Authority (EFSA) Journal 2012;10(1):2551

United Nations Environment Programme (UNEP), Interim review of scientific information on cadmium; 2010

Zapata F, Roy RN. 2007. Introducción. En Zapata F, Roy RN (eds): Utilización de las rocas fosfóricas para una agricultura sostenible. Boletín FAO fertilizantes y nutrición vegetal. FAO 13: 1-9.